

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-004-04 改 02
提出年月日	2022年9月8日

VI-2-4-2-3 制御棒・破損燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書

2022年9月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	3
2.3 適用規格・基準等	4
2.4 記号の説明	5
2.5 計算精度と数値の丸め方	8
3. 評価部位	9
4. 固有周期	11
4.1 固有周期の計算方法	11
4.2 固有周期の計算条件	12
4.3 固有周期の計算結果	12
5. 構造強度評価	13
5.1 構造強度評価方法	13
5.2 荷重の組合せ及び許容応力	13
5.3 設計用地震力	17
5.4 計算方法	18
5.5 計算条件	25
5.6 応力の評価	25
6. 評価結果	26
6.1 設計基準対象施設としての評価結果	26
6.2 重大事故等対処設備としての評価結果	26

1. 概要

本計算書は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、制御棒・破損燃料貯蔵ラック（以下「ラック」という。）が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

ラックは、設計基準対象施設においてはSクラス施設に、重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備としての構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

ラックの構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>ラックは、原子炉建物の燃料プールの底部に基礎ボルトで固定し、さらにラックの短辺方向は壁に基礎ボルトで固定したサポートで支持される。</p>	<p>たて置ラック式（ステンレス鋼製）ラック部材の組立ては、パイプとベースはパイプを1本ごとに順次パイプの外周を、パイプ間はパイプ同士を溶接にて接合している。 破損燃料格納容器は、最大10体をラック内に挿入できる。</p>	

2.2 評価方針

ラックの応力評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2.1 構造計画」にて示すラックの部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4. 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「5. 構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「6. 評価結果」に示す。

ラックの耐震評価フローを図 2-1 に示す。

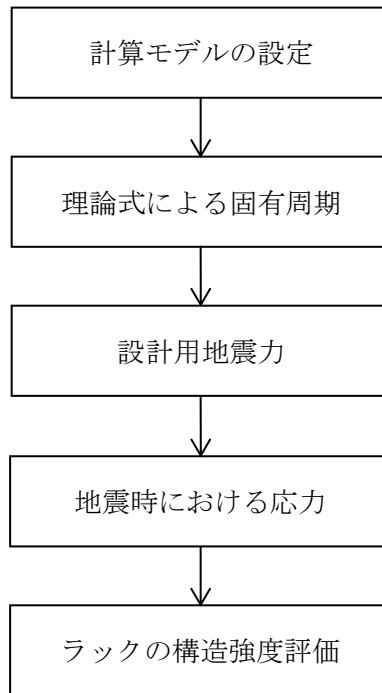


図 2-1 ラックの耐震評価フロー

2.3 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984
((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格 ((社) 日本機械学会, 2005/2007) (以下「設計・建設規格」という。)

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	ラックの断面積	mm ²
A _b	基礎ボルトの軸断面積	mm ²
A _p	サポートの断面積	mm ²
A _{p x} , A _{p z}	サポートのせん断断面積	mm ²
A _{s i} * ¹	ラックのせん断断面積	mm ²
C _H	水平方向設計震度	—
C _V	鉛直方向設計震度	—
d	基礎ボルトの呼び径	mm
E	縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3121.1(1)に定める値	MPa
F*	設計・建設規格 SSB-3121.3 又は SSB-3133 に定める値	MPa
F _a	ラックに働く軸力	N
F _i * ¹	ラックに働くせん断力	N
F _{y B}	ベース底部からラック重心位置までに働くせん断力	N
F _{y G}	ラック重心位置からサポート位置までに働くせん断力	N
F _{y i} * ¹	サポート部に働く軸力	N
F _{x i} , F _{z i} * ¹	サポート部に働くせん断力	N
f _{1 i} , f _{2 i} * ¹	底部基礎ボルトに働く引張力 (1本当たり)	N
f _{s m}	部材の許容せん断応力	MPa
f _{s b}	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f _{t m}	部材の許容引張応力	MPa
f _{t o}	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f _{t s}	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力 (許容組合せ応力)	MPa
G	せん断弾性係数	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
h ₁	破損燃料貯蔵時のラック重心高さ (応力評価時に使用)	mm
h ₂	破損燃料貯蔵時のラック重心からサポートまでの高さ (応力評価時に使用)	mm
h ₃	サポート高さ	mm
h _{x 1}	破損燃料貯蔵時のラック重心高さ (X方向の固有周期計算時に使用)	mm
h _{y 1}	破損燃料貯蔵時のラック重心高さ (Y方向の固有周期計算時に使用)	mm
h _{y 2}	破損燃料貯蔵時のラック重心からサポートまでの高さ (Y方向の固有周期計算時に使用)	mm
h _{z 1}	破損燃料貯蔵時のラック重心高さ (Z方向の固有周期計算時に使用)	mm
I _x	ラックの断面二次モーメント (X軸回り)	mm ⁴
I _y	ラックの断面二次モーメント (Y軸回り)	mm ⁴

記号	記号の説明	単位
K_i^{*1}	ラックのばね定数	N/mm
K_z	ラックのばね定数 (Z方向の固有周期計算時に使用)	N/mm
l	サポート取付部からサポート重心までの水平距離	mm
$l_{g_i}^{*1}$	ベース端からラック重心までの距離	mm
l_1, l_2, l_3, l_4	サポート部基礎ボルトの中心からプレート先端までの距離	mm
l_{1i}, l_{2i}^{*1}	ベース端から底部基礎ボルトまでの距離	mm
l_s	サポート中心からラックによるサポート反力発生点までの距離	mm
M_i^{*1}	ラックの転倒モーメント	N・mm
M_{xB}	ベース底部の転倒モーメント	N・mm
M_{xG}	ラック重心位置の転倒モーメント	N・mm
M_{xi}, M_{zi}^{*1}	サポート部に働くモーメント	N・mm
m	破損燃料貯蔵時のラックの全質量 (応力評価時に使用)	kg
m_a	破損燃料貯蔵時のラックの全質量 (固有周期計算時に使用)	kg
m_c	破損燃料格納容器の質量	kg
m_F	破損燃料の質量	kg
m_R	ラックの質量	kg
m_s	サポートの全質量	kg
m_{sa}	サポートの質量	kg
m_{sth}	サポートの排除水質量*2	kg
m_{th}	ラックの排除水質量*2	kg
m_{vi}^{*1}	ラックの付加質量*3	kg
m_{vz}	ラックの付加質量*3 (Z方向)	kg
m_w	ラックに含まれる水の質量	kg
N_{pm}	M_{xi}, M_{zi} により生じる基礎ボルト1本当たりの最大引張力	N
n	底部及びサポート部基礎ボルトの全本数	—
n_{1i}, n_{2i}^{*1}	各部の底部基礎ボルトの本数	—
R	ラックによるサポート反力	N
R_B	ベース底部の反力	N
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
$S_y(RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める材料の40℃における値	MPa
T_i^{*1}	固有周期	s
T_z	固有周期 (Z方向)	s
Z_x	ラックの断面係数 (X軸回り)	mm ³
Z_y	ラックの断面係数 (Y軸回り)	mm ³
Z_{px}, Z_{pz}	サポートの断面係数	mm ³
σ_b	基礎ボルトに生じる引張応力	MPa

記号	記号の説明	単位
σ_{fa}	部材に生じる組合せ応力	MPa
σ_{ft}	部材に生じる引張応力	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_f	部材に生じるせん断応力	MPa

注記*1: A_{si} , F_i , F_{yi} , F_{xi} , F_{zi} , f_{1i} , f_{2i} , K_i , l_{gi} , l_{1i} , l_{2i} , M_i , M_{xi} , M_{zi} , m_{vi} , n_{1i} , n_{2i} 及び T_i の添字 i の意味は、以下のとおりとする。

$i = x$: X方向 (長辺方向)

$i = y$: Y方向 (短辺方向)

*2: 排除水質量とは、機器が流体中にある場合に、機器が排除する流体の質量であり、ラックの質量として考慮する、貯蔵物、ラック自身、ラックに含まれる水が占める体積分の水に相当する質量を示す。

*3: 付加質量とは、機器が流体中で加速度を受けた場合に質量が増加したような効果を模擬した、機器の形状により定まる仮想質量をいう。

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字 6 桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表 2-2 に示すとおりである。

表 2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第 4 位	四捨五入	小数点以下第 3 位
震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
温度	°C	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ	mm	—	—	整数位 ^{*1}
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
モーメント	N・mm	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*3}	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記*1：設計上定める値が小数点以下第 1 位の場合は、小数点以下第 1 位表示とする。

*2：絶対値が 1000 以上のときはべき数表示とする。

*3：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における引張強さ及び降伏点は、比例法により補間した値の小数点以下第 1 位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

ラックの耐震評価は、「5.1 構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなるラック、サポート部材及び基礎ボルトについて実施する。ラックの耐震評価部位については、図3-1の構造概要図に示す。ただし、破損燃料格納容器はラックに挿入されているだけであるため、ラックの耐震評価の計算に見込むが評価部位とはしない。

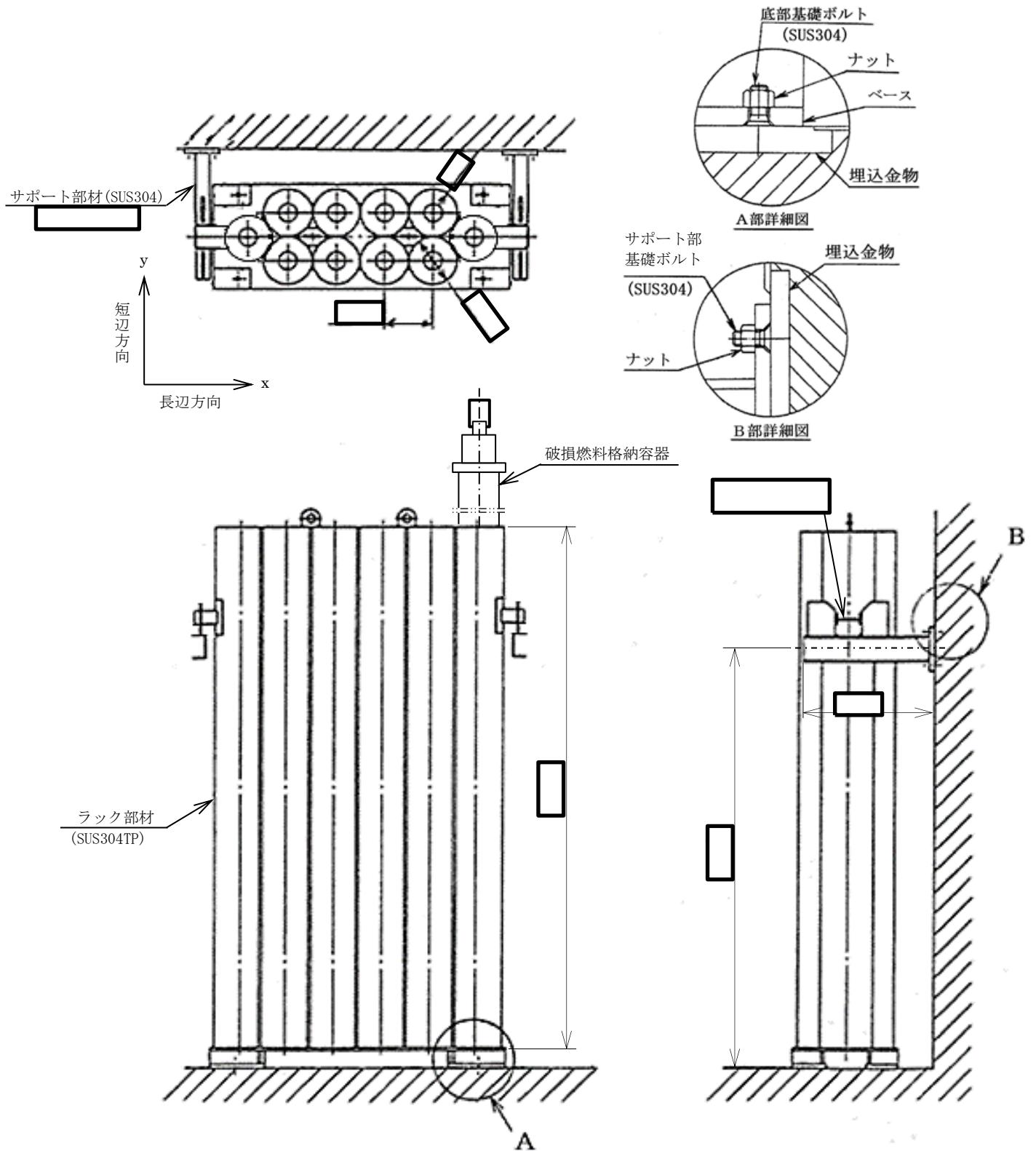


図 3-1 構造概要図 (単位: mm)

4. 固有周期

4.1 固有周期の計算方法

- (1) ラックの質量は、破損燃料と破損燃料格納容器 10 体の質量、ラック自身の質量、ラックに含まれる水の質量及び付加質量を考慮した値とする。なお、付加質量は形状によって決まり、ラックは軸方向により断面形状が異なるため、付加質量及び重心位置は軸方向ごとに評価する。
- (2) ラックは、ベース底部で基礎ボルトを介し床に完全固定とする。
- (3) 変形モードは、曲げたわみとせん断たわみの合成とする。
- (4) ラックは、Y方向の振動に対してサポートにより支持されるものとする。
- (5) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。
- (6) 本ラックは、各部材をすべて溶接にて接合されており、一体の構造物とみなして、上述より図 4-1 に示すようなラックの重心位置での 1 質点系の計算モデルと考える。
- (7) 図 4-1 に示す 1 質点系の計算モデルの固有周期は、(4.1.1)及び(4.1.2)式より求める。

$$T_i = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_a + m_{v i}}{1000 \cdot K_i}} \quad \dots \dots \dots (4.1.1)$$

(i = x : X方向 (長辺方向), y : Y方向 (短辺方向))

$$T_z = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_a + m_{v z}}{1000 \cdot K_z}} \quad \dots \dots \dots (4.1.2)$$

ただし、ラックのばね定数は、(4.1.3)、(4.1.4)及び(4.1.5)式より求める。

$$K_x = \frac{1}{\frac{h_{x1}^3}{3 \cdot E \cdot I_y} + \frac{h_{x1}}{A_{sx} \cdot G}} \quad \dots \dots \dots (4.1.3)$$

$$K_y = \frac{1}{\frac{h_{y2}^2 \cdot h_{y1}^3 \cdot (4 \cdot h_{y2} + 3 \cdot h_{y1})}{12 \cdot E \cdot I_x \cdot h_3^3} + \frac{h_{y2} \cdot h_{y1}}{A_{sy} \cdot G \cdot h_3}} \quad \dots \dots \dots (4.1.4)$$

$$K_z = \frac{A \cdot E}{h_{z1}} \quad \dots \dots \dots (4.1.5)$$

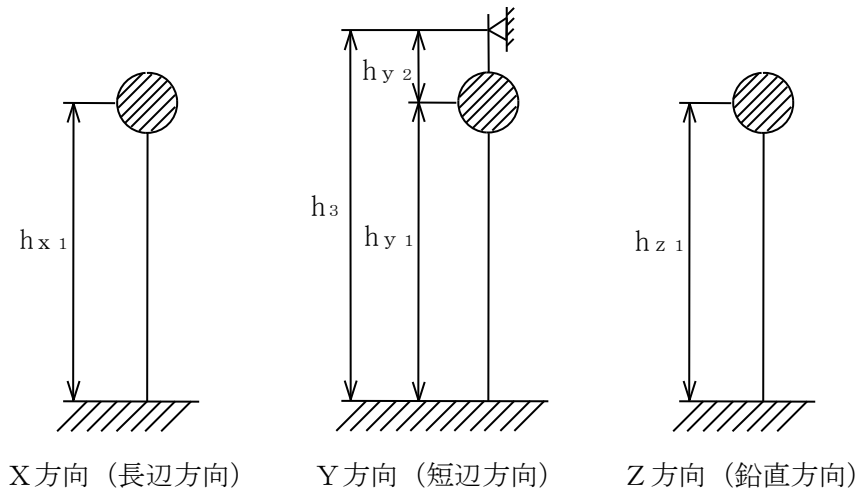


図 4-1 計算モデル

4.2 固有周期の計算条件

固有周期の計算に用いる計算条件は、本計算書の【制御棒・破損燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算結果】の機器要目に示す。

4.3 固有周期の計算結果

固有周期の計算結果を表 4-1 に示す。計算の結果、固有周期は 0.05 秒以下であり、剛構造であることを確認した。

表 4-1 固有周期 (単位：s)

	固有周期
X 方向 (長辺方向)	
Y 方向 (短辺方向)	
Z 方向 (鉛直方向)	

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

4.1 項(5)のほか、次の条件で計算する。

- (1) ラックは、原子炉建物の燃料プールの底部 (EL 30.83m) に基礎ボルトで固定し、更に壁からのサポートで支持されるものとする。
- (2) ラックの質量は、破損燃料と破損燃料格納容器 10 体の質量、ラック自身の質量及びラックに含まれる水の質量とする。また、更に精緻に評価するため、排除水質量（水中に設置される機器が排除する水の質量）の減算を考慮する。
- (3) 地震力は、ラックに対して水平方向及び鉛直方向から作用するものとする。

ここで水平方向地震力は、ラックの長辺方向に作用する場合と短辺方向に作用する場合を考慮する。

また、水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組合せには、部材は絶対値和、基礎ボルトは S R S S 法を適用する。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

ラックの荷重の組合せ及び許容応力状態のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 5-1 に、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 5-2 に示す。

5.2.2 許容応力

ラックの許容応力は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表 5-3 に示す。

5.2.3 使用材料の許容応力評価条件

ラックの使用材料の許容応力評価条件のうち設計基準対象施設の評価に用いるものを表 5-4 に、重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 5-5 に示す。

表 5-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設 及び貯蔵施設	使用済燃料 貯蔵設備	制御棒・破損燃料 貯蔵ラック	S	—*	$D + P_D + M_D + S_d^*$	Ⅲ _A S
					$D + P_D + M_D + S_s$	Ⅳ _A S

注記*：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

表 5-2 荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類* ¹	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設 及び貯蔵施設	使用済燃料 貯蔵設備	制御棒・破損燃料 貯蔵ラック	常設耐震／防止 常設／緩和	—* ²	$D + P_D + M_D + S_s^*$ ³	Ⅳ _A S
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	V _A S (V _A SとしてⅣ _A Sの 許容限界を用いる。)

注記*1：「常設耐震／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*2：重大事故等その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

*3：「 $D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$ 」の評価に包絡されるため，評価結果の記載を省略する。

表 5-3 許容応力（その他の支持構造物及び重大事故等その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界 ^{*1, *2} （ボルト等以外）		許容限界 ^{*1, *2} （ボルト等）	
	一次応力		一次応力	
	引張	せん断	引張	せん断
Ⅲ _A S	$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$	$1.5 \cdot f_t$	$1.5 \cdot f_s$
Ⅳ _A S	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$
Ⅴ _A S (Ⅴ _A SとしてⅣ _A Sの 許容限界を用いる。)				

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

*2：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 5-4 使用材料の許容応力評価条件 (設計基準対象施設)

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
		周囲環境温度					
ラック	SUS304TP	周囲環境温度	66	—	188	479	205
サポート	SUS304	周囲環境温度	66	—	188	479	205
基礎ボルト	SUS304	周囲環境温度	66	—	188	479	205

表 5-5 使用材料の許容応力評価条件 (重大事故等対処設備)

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
		周囲環境温度					
ラック	SUS304TP	周囲環境温度	100	—	171	441	205
サポート	SUS304	周囲環境温度	100	—	171	441	205
基礎ボルト	SUS304	周囲環境温度	100	—	171	441	205

5.3 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 5-6 及び表 5-7 に示す。

「弾性設計用地震動 S d 又は静的震度」及び「基準地震動 S s」による地震力は、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。

表 5-6 設計用地震力（設計基準対象施設）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
	水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
原子炉建物 EL 30.83 (EL 34.8*1)	□		$C_H=1.06^{*2}$	$C_V=0.96^{*2}$	$C_H=2.32^{*3}$	$C_V=1.79^{*3}$

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度 I（弾性設計用地震動 S d）又は静的震度

*3：設計用震度 I（基準地震動 S s）を上回る設計震度

表 5-7 設計用地震力（重大事故等対処設備）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
	水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
原子炉建物 EL 30.83 (EL 34.8*1)	□		—	—	$C_H=2.32^{*2}$	$C_V=1.79^{*2}$

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度 I（基準地震動 S s）を上回る設計震度

5.4 計算方法

5.4.1 ラック部材の応力

部材の荷重状態を図5-1に示す。なお、部材の荷重状態は下端固定，サポート支持としており，重心位置に集中荷重が作用すると想定する。

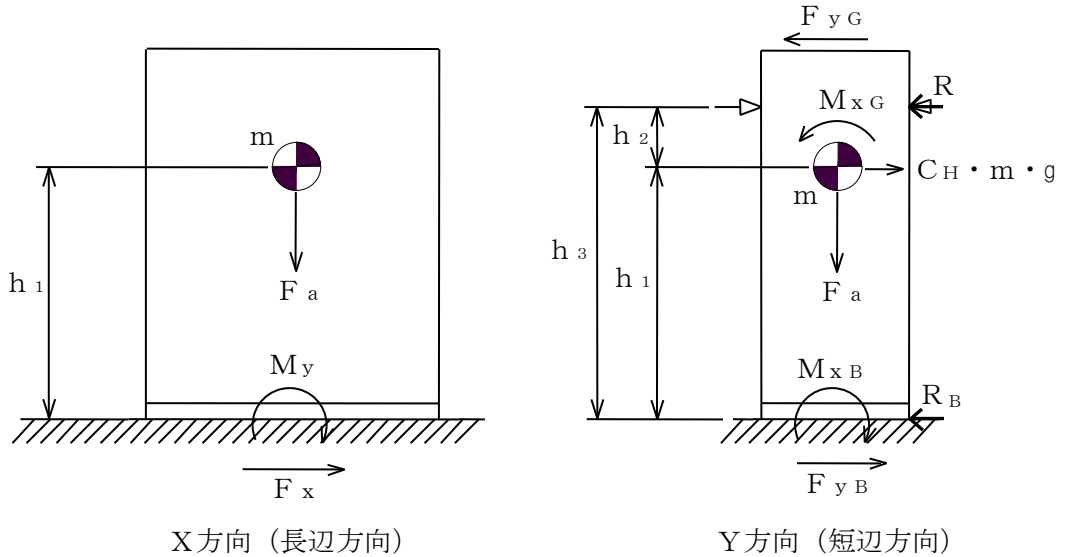


図5-1 荷重状態

ラックの全質量は，(5.4.1)式より破損燃料と破損燃料格納容器10体の質量，ラック自身の質量及びラックに含まれる水の質量の合計から排除水質量を減じて求める。

$$m = m_c + m_F + m_R + m_w - m_{th} \quad \dots \quad (5.4.1)$$

ここで， m_{th} は排除水質量（水中に設置される機器が排除する水の質量）を示す。

(1) せん断応力

せん断力 F_i により，部材に生じるせん断応力 τ_f は，(5.4.2)式より求める。

$$\tau_f = \frac{F_i}{A_{s_i}} \quad \dots \quad (5.4.2)$$

($i = x$: X方向 (長辺方向)， y : Y方向 (短辺方向))

ここで，ラックに働くせん断力 F_i は，(5.4.3)，(5.4.4)，(5.4.5)及び(5.4.6)式より求める。

$$F_x = C_H \cdot m \cdot g \quad \dots \quad (5.4.3)$$

$$F_y = \text{Max}(F_{yB}, F_{yG}) \quad \dots \quad (5.4.4)$$

ラックの地震荷重は重心位置への集中荷重とすることから， $F_{yB} = R_B$ ， $F_{yG} = R$ となるため，以下の通りとなる。

$$F_{yB} = R_B = \frac{C_H \cdot m \cdot g \cdot h_2}{2 \cdot h_3^3} \cdot (2 \cdot h_2^2 + 6 \cdot h_1 \cdot h_2 + 3 \cdot h_1^2) \quad \dots \quad (5.4.5)$$

$$F_{yG} = R = \frac{C_H \cdot m \cdot g \cdot h_1^2}{2 \cdot h_3^3} \cdot (3 \cdot h_2 + 2 \cdot h_1) \quad \dots \quad (5.4.6)$$

(2) 引張応力

軸力 F_a 及び転倒モーメント M_i により部材に生じる引張応力 σ_{ft} は, (5.4.7) 及び (5.4.8) 式より求める。

$$\sigma_{ft} = \frac{F_a}{A} + \frac{M_y}{Z_y} \dots\dots\dots (5.4.7)$$

$$\sigma_{ft} = \frac{F_a}{A} + \frac{M_x}{Z_x} \dots\dots\dots (5.4.8)$$

ここで, ラックに働く軸力 F_a 及びラックの転倒モーメント M_i は, (5.4.9), (5.4.10), (5.4.11), (5.4.12) 及び (5.4.13) 式より求める。

$$F_a = (1 + C_v) \cdot m \cdot g \dots\dots\dots (5.4.9)$$

$$M_x = \text{Max}(M_{xB}, M_{xG}) \dots\dots\dots (5.4.10)$$

$$M_{xB} = C_H \cdot m \cdot g \cdot h_1 - R \cdot h_3$$

$$= \frac{C_H \cdot m \cdot g \cdot h_1 \cdot h_2}{2 \cdot h_3^2} \cdot (2 \cdot h_2 + h_1) \dots\dots\dots (5.4.11)$$

$$M_{xG} = R \cdot h_2 = \frac{C_H \cdot m \cdot g \cdot h_2 \cdot h_1^2}{2 \cdot h_3^3} \cdot (3 \cdot h_2 + 2 \cdot h_1) \dots\dots (5.4.12)$$

$$M_y = F_x \cdot h_1 \dots\dots\dots (5.4.13)$$

(3) 組合せ応力

部材に生じる組合せ応力 σ_{fa} は, (5.4.14) 式より求める。

$$\sigma_{fa} = \sqrt{\sigma_{ft}^2 + 3 \cdot \tau_f^2} \dots\dots\dots (5.4.14)$$

5.4.2 底部基礎ボルトの応力

基礎ボルトの荷重状態を図5-2に示す。

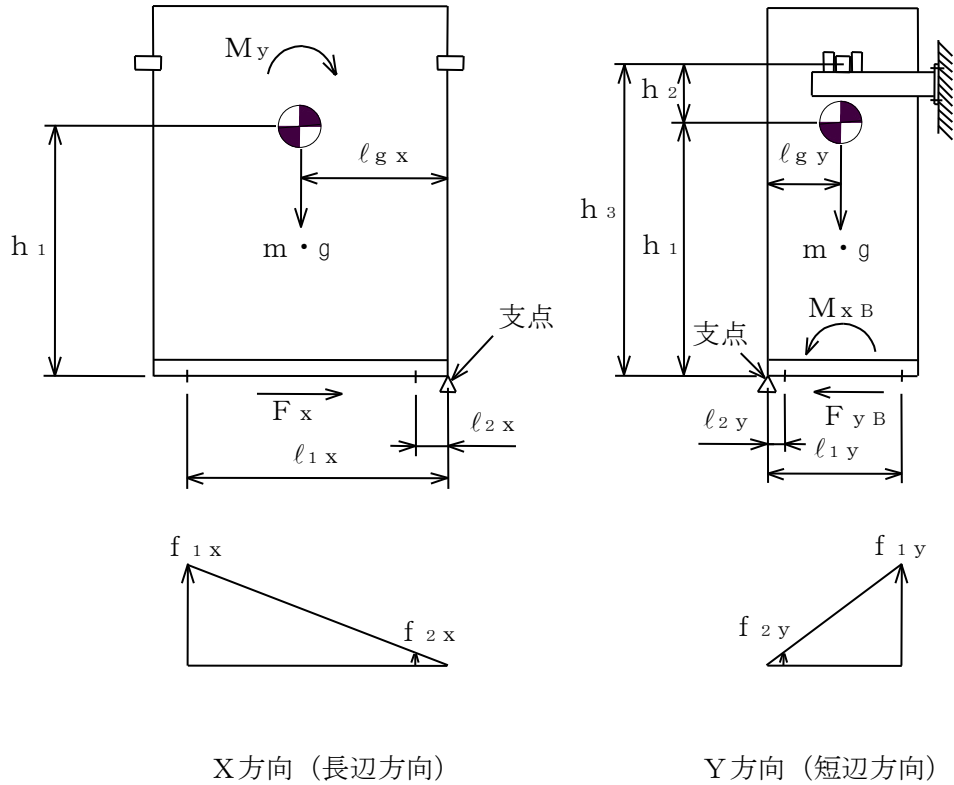


図5-2 荷重状態

(1) せん断応力

ベース底部に働くせん断力 F_x 又は F_{yB} により，基礎ボルトに生じるせん断応力 τ_b は，(5.4.15)及び(5.4.16)式より求める。

$$\tau_b = \frac{F_x}{n \cdot A_b} \dots\dots\dots (5.4.15)$$

$$\tau_b = \frac{F_{yB}}{n \cdot A_b} \dots\dots\dots (5.4.16)$$

ここで，基礎ボルトの軸断面積 A_b は(5.4.17)式より求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \dots\dots\dots (5.4.17)$$

(2) 引張応力

図 5-2 荷重状態において支点回りのモーメントの平衡により基礎ボルト 1 本当たりの引張力 f_{1i} , f_{2i} を求める。

$f_{1i} > f_{2i}$ の関係にあるので f_{1i} のみを (5.4.18) 及び (5.4.19) 式より求める。

$$f_{1x} = \frac{\ell_{1x} \cdot \{\sqrt{M_y^2 + (C_V \cdot m \cdot g \cdot \ell_{gx})^2} - m \cdot g \cdot \ell_{gx}\}}{n_{1x} \cdot \ell_{1x}^2 + n_{2x} \cdot \ell_{2x}^2} \dots\dots\dots (5.4.18)$$

$$f_{1y} = \frac{\ell_{1y} \cdot \{\sqrt{M_{xB}^2 + (C_V \cdot m \cdot g \cdot \ell_{gy})^2} - m \cdot g \cdot \ell_{gy}\}}{n_{1y} \cdot \ell_{1y}^2 + n_{2y} \cdot \ell_{2y}^2} \dots\dots\dots (5.4.19)$$

したがって、引張力 f_{1i} により基礎ボルトに生じる引張応力 σ_b は、(5.4.20) 式より求める。

$$\sigma_b = \frac{f_{1i}}{A_b} \dots\dots\dots (5.4.20)$$

($i = x$: X 方向 (長辺方向), y : Y 方向 (短辺方向))

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は、(5.4.17) 式による。

ただし、 f_{1i} の値が負となった場合は、引張力が生じないので以後の引張応力の計算は省略する。

5.4.3 サポート部材の応力

サポート部材にかかる荷重状態を図 5-3 に示す。

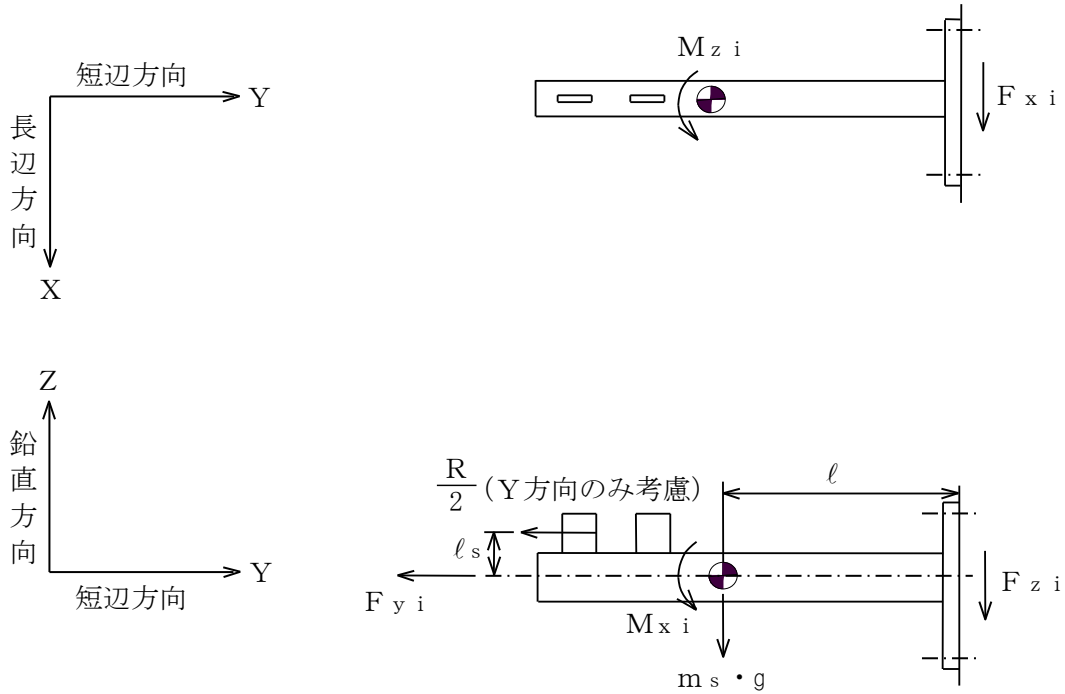


図 5-3 荷重状態

サポートの全質量は、(5.4.21)式よりサポートの質量から排除水質量を減じて求める。

$$m_s = m_{sa} - m_{sth} \quad \dots \dots \dots (5.4.21)$$

ここで、 m_{sth} は排除水質量（水中に設置される機器が排除する水の質量）を示す。

(1) せん断応力

せん断力 F_{xi} 、 F_{zi} により部材に生じるせん断応力 τ_f は、(5.4.22)式より求める。

$$\tau_f = \sqrt{\left(\frac{F_{xi}}{A_{px}}\right)^2 + \left(\frac{F_{zi}}{A_{pz}}\right)^2} \quad \dots \dots \dots (5.4.22)$$

($i = x$: X方向 (長辺方向), y : Y方向 (短辺方向))

ここで、サポート部に働くせん断力は、(5.4.23)、(5.4.24)及び(5.4.25)式より求める。

$$F_{xx} = C_H \cdot m_s \cdot g \quad \dots \dots \dots (5.4.23)$$

$$F_{xy} = 0 \quad \dots \dots \dots (5.4.24)$$

$$F_{zi} = (1 + C_v) \cdot m_s \cdot g \quad \dots \dots \dots (5.4.25)$$

($i = x$: X方向 (長辺方向), y : Y方向 (短辺方向))

(2) 引張応力

軸力 $F_{y i}$ 及び曲げモーメント $M_{x i}$, $M_{z i}$ により部材に生じる引張応力 $\sigma_{f t}$ は、
(5.4.26) 式より求める。

$$\sigma_{f t} = \frac{F_{y i}}{A_p} + \frac{M_{x i}}{Z_{p x}} + \frac{M_{z i}}{Z_{p z}} \quad \dots\dots\dots (5.4.26)$$

($i = x$: X 方向 (長辺方向), y : Y 方向 (短辺方向))

ここで、サポート部に働く軸力及びモーメントは、(5.4.27), (5.4.28), (5.4.29),
(5.4.30), (5.4.31) 及び(5.4.32) 式より求める。

$$F_{y x} = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.27)$$

$$F_{y y} = \frac{R}{2} + C_H \cdot m_s \cdot g \quad \dots\dots\dots (5.4.28)$$

$$M_{x x} = (1 + C_V) \cdot m_s \cdot g \cdot \ell \quad \dots\dots\dots (5.4.29)$$

$$M_{x y} = (1 + C_V) \cdot m_s \cdot g \cdot \ell + \frac{R}{2} \cdot \ell_s \quad \dots\dots\dots (5.4.30)$$

$$M_{z x} = C_H \cdot m_s \cdot g \cdot \ell \quad \dots\dots\dots (5.4.31)$$

$$M_{z y} = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.32)$$

(3) 組合せ応力

組合せ応力 $\sigma_{f a}$ は、(5.4.33) 式より求める。

$$\sigma_{f a} = \sqrt{\sigma_{f t}^2 + 3 \cdot \tau_f^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.33)$$

5.4.4 サポート部基礎ボルトの応力

基礎ボルトに作用する引張力 $F_{y i}$ ，せん断力 $F_{x i}$ ， $F_{z i}$ 及び曲げモーメント $M_{x i}$ ， $M_{z i}$ の荷重状態を図5-4に示す。

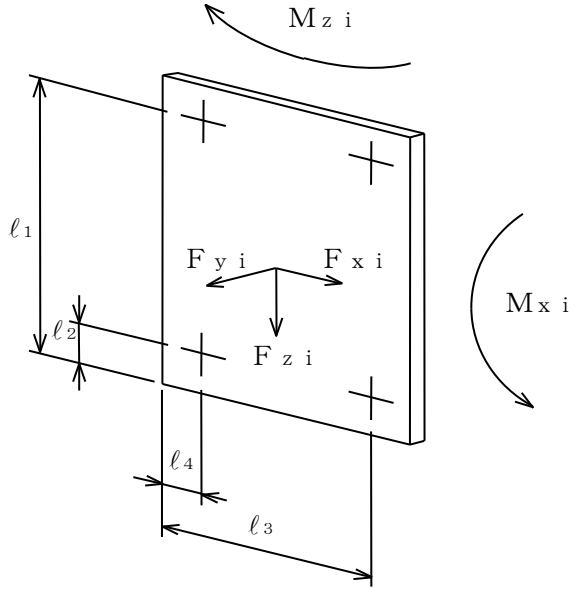


図5-4 荷重状態

(1) せん断応力

せん断力 $F_{x i}$ ， $F_{z i}$ により基礎ボルトに生じるせん断応力 τ_b は，(5.4.34)式より求める。

$$\tau_b = \frac{\sqrt{F_{x i}^2 + F_{z i}^2}}{n \cdot A_b} \dots\dots\dots (5.4.34)$$

($i = x$: X方向 (長辺方向), y : Y方向 (短辺方向))

ここで，基礎ボルトの軸断面積 A_b は，(5.4.17)式による。

(2) 引張応力

曲げモーメント $M_{x i}$ ， $M_{z i}$ により生じる基礎ボルト1本当たりの最大引張力 $N_{p m}$ 及び軸力 $F_{y i}$ により生じる基礎ボルトの引張応力 σ_b は，(5.4.35)式より求める。

$$\sigma_b = \frac{N_{p m}}{A_b} + \frac{F_{y i}}{n \cdot A_b} \dots\dots\dots (5.4.35)$$

($i = x$: X方向 (長辺方向), y : Y方向 (短辺方向))

ここで，基礎ボルトの軸断面積 A_b は，(5.4.17)式による。

また，基礎ボルト1本当たりの最大引張力は(5.4.36)式より求める。

$$N_{p m} = \sqrt{\left[\frac{l_1 \cdot M_{x i}}{2 \cdot (l_1^2 + l_2^2)} \right]^2 + \left[\frac{l_3 \cdot M_{z i}}{2 \cdot (l_3^2 + l_4^2)} \right]^2} \dots\dots\dots (5.4.36)$$

($i = x$: X方向 (長辺方向), y : Y方向 (短辺方向))

5.5 計算条件

応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【制御棒・破損燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

5.6 応力の評価

5.6.1 部材の応力評価

5.4.1 項及び5.4.3 項で求めた各部材の引張応力 σ_{ft} 及び組合せ応力 σ_{fa} が、許容引張応力 f_{tm} 以下であること。

また、5.4.1 項及び5.4.3 項で求めた各部材のせん断応力 τ_f が、許容せん断応力 f_{sm} 以下であること。ただし、 f_{tm} 及び f_{sm} は下表による。

	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による荷重 との組合せの場合	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{tm}	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sm}	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

5.6.2 基礎ボルトの応力評価

5.4.2 項及び5.4.4 項で求めた基礎ボルトの引張応力 σ_b は次式より求めた許容組合せ応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \dots\dots\dots (5.6.1)$$

また、5.4.2 項及び5.4.4 項で求めた基礎ボルトのせん断応力 τ_b が、せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。ただし、 f_{sb} は下表による。

	弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度による荷重 との組合せの場合	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F}{2} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

6. 評価結果

6.1 設計基準対象施設としての評価結果

ラックの設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

6.2 重大事故等対処設備としての評価結果

ラックの重大事故等時の状態を考慮した場合の耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

【制御棒・破損燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機器名称	耐震重要度 分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度		
制御棒・破損燃料 貯蔵ラック	S	原子炉建物 EL 30.83 (EL 34.8 ^{*1})			$C_H=1.06^{*2}$	$C_V=0.96^{*2}$	$C_H=2.32^{*3}$	$C_V=1.79^{*3}$	—	66

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度 I（弾性設計用地震動 S d）又は静的震度

*3：設計用震度 I（基準地震動 S s）を上回る設計震度


1.2 機器要目

1.2.1 固有周期の計算に用いる要目

m a (kg)	m c (kg)	m F (kg)	m R (kg)	m w (kg)	m v x (kg)	m v y (kg)	m v z (kg)	A (mm ²)	A s x (mm ²)	A s y (mm ²)	I x (mm ⁴)	I y (mm ⁴)
								3.547×10^4	1.773×10^4	1.773×10^4	8.491×10^8	5.924×10^9

E (MPa)	G (MPa)	h x 1 (mm)	h y 1 (mm)	h z 1 (mm)	h y 2 (mm)	h 3 (mm)
192000	73800	2144	1913	2298	625	2538

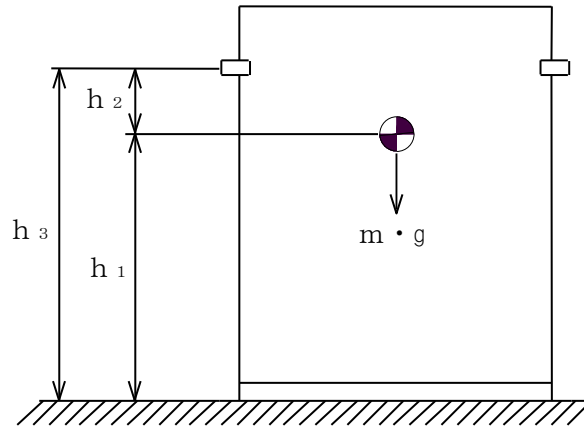
1.2.2 部材の応力評価に用いる要目

m (kg)	m _c (kg)	m _F (kg)	m _R (kg)	m _w (kg)	m _{t h} (kg)	m _s (kg)	m _{s a} (kg)	m _{s t h} (kg)	A (mm ²)	A _{s x} (mm ²)	A _{s y} (mm ²)
									3.547×10^4	1.773×10^4	1.773×10^4

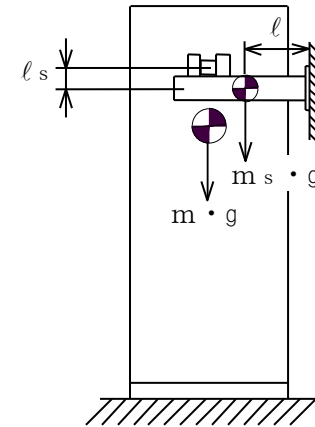
A _p (mm ²)	A _{p x} (mm ²)	A _{p z} (mm ²)	Z _x (mm ³)	Z _y (mm ³)	Z _{p x} (mm ³)	Z _{p z} (mm ³)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	l _s (mm)	l (mm)
1.728×10^3	642.4	768.9	3.110×10^6	7.571×10^6	7.976×10^4	1.735×10^4	2187	351	2538	175	286

	材料	S _y * (MPa)	S _u * (MPa)	S _y (R T) (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)
ラック	SUS304TP	188	479	205	205	246
サポート	SUS304					

注記*：周囲環境温度(66℃)で算出



X方向 (長辺方向)



Y方向 (短辺方向)

1.2.3 基礎ボルトの応力評価に用いる要目

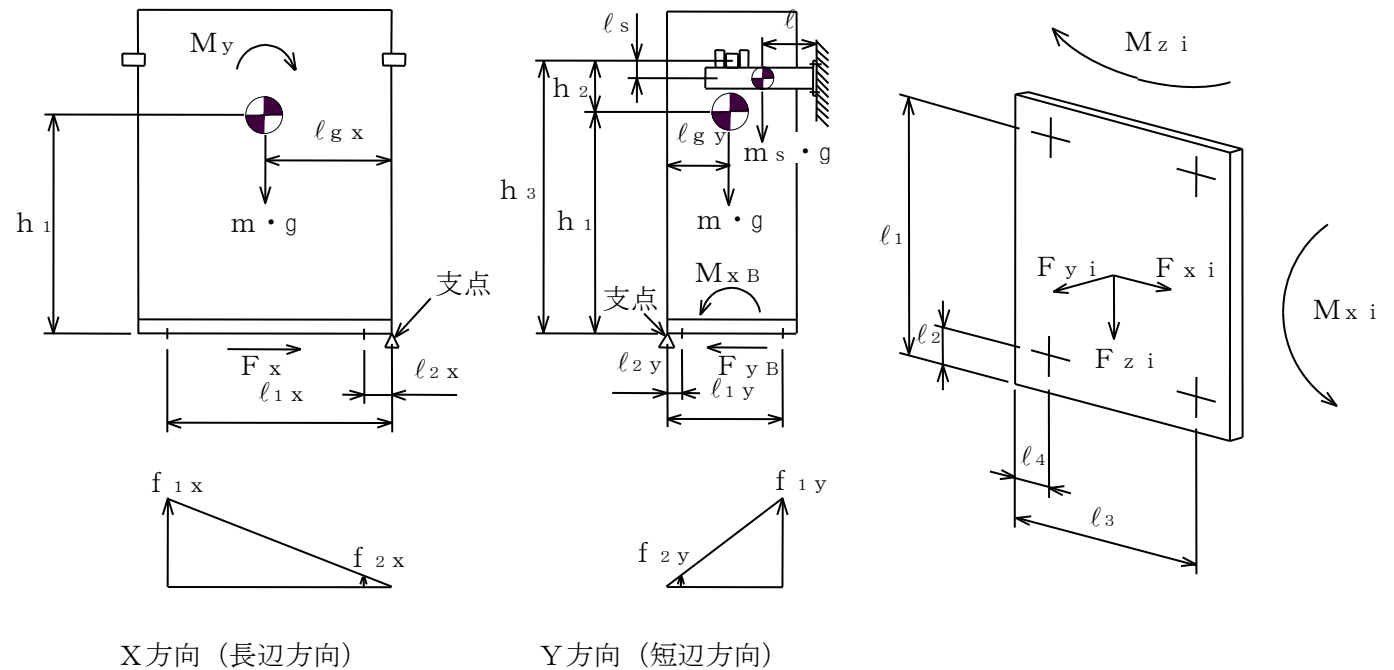
m (kg)	m _s (kg)	d (mm)		A _b (mm ²)		ℓ _{1x} (mm)	ℓ _{2x} (mm)	ℓ _{1y} (mm)	ℓ _{2y} (mm)
		底部基礎ボルト	サポート部基礎ボルト	底部基礎ボルト	サポート部基礎ボルト				
		24 (M24)	16 (M16)	452.4	201.1	1470	150	540	60

ℓ (mm)	ℓ _s (mm)	ℓ ₁ (mm)	ℓ ₂ (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ ₄ (mm)	ℓ _{gx} (mm)	ℓ _{gy} (mm)	n	n _{1x}	n _{2x}	n _{1y}	n _{2y}
286	175	265	35	265	35	810	300	4	2	2	2	2

基礎ボルト材料	S _y * (MPa)	S _u * (MPa)	S _y (RT) (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)
SUS304	188	479	205	205	246

29

注記* : 周囲環境温度 (66°C) で算出



1.3 計算数値

1.3.1 部材に生じる応力

(単位：MPa)

部材	応力の種類	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向
ラック	引張 σ_{ft}	16	7	33	13
	せん断 τ_f	3	2	6	5
	組合せ σ_{fa}	17	8	35	15
サポート	引張 σ_{ft}	7	54	14	115
	せん断 τ_f	1	1	2	1
	組合せ σ_{fa}	8	54	14	115

1.3.2 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

基礎 ボルト	応力の種類	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向
底部	引張 σ_b	54	4	146	33
	せん断 τ_b	26	6	56	12
サポート部	引張 σ_b	2	55	3	118
	せん断 τ_b	1	1	2	1

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位：s)

方向	固有周期
水平方向 (X方向)	$T_x =$ <input type="text"/>
水平方向 (Y方向)	$T_y =$ <input type="text"/>
鉛直方向 (Z方向)	$T_z =$ <input type="text"/>

1.4.2 部材に生じる応力 (単位：MPa)

部材	材料	応力の種類	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
ラック	SUS304TP	引張	$\sigma_{ft}=16$	$f_{tm}=205$	$\sigma_{ft}=33$	$f_{tm}=246$
		せん断	$\tau_f = 3$	$f_{sm}=118$	$\tau_f = 6$	$f_{sm}=142$
		組合せ	$\sigma_{fa}=17$	$f_{tm}=205$	$\sigma_{fa}=35$	$f_{tm}=246$
サポート	SUS304	引張	$\sigma_{ft}=54$	$f_{tm}=205$	$\sigma_{ft}=115$	$f_{tm}=246$
		せん断	$\tau_f = 1$	$f_{sm}=118$	$\tau_f = 1$	$f_{sm}=142$
		組合せ	$\sigma_{fa}=54$	$f_{tm}=205$	$\sigma_{fa}=115$	$f_{tm}=246$

すべて許容応力以下である。

1.4.3 基礎ボルトに生じる応力 (単位：MPa)

基礎ボルト	材料	応力の種類	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
底部	SUS304	引張	$\sigma_b=54$	$f_{ts}=153^*$	$\sigma_b=146$	$f_{ts}=168^*$
		せん断	$\tau_b=26$	$f_{sb}=118$	$\tau_b=56$	$f_{sb}=142$
サポート部		引張	$\sigma_b=55$	$f_{ts}=153^*$	$\sigma_b=118$	$f_{ts}=184^*$
		せん断	$\tau_b=1$	$f_{sb}=118$	$\tau_b=1$	$f_{sb}=142$

すべて許容応力以下である。

注記* : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

【制御棒・破損燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算結果】

2. 重大事故等対処設備

2.1 設計条件

機器名称	設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度		
制御棒・破損燃料 貯蔵ラック	常設耐震／防止 常設／緩和	原子炉建物 EL 30.83 (EL 34.8 ^{*1})			—	—	C _H =2.32 ^{*2}	C _V =1.79 ^{*2}	—	100

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度 I（基準地震動 S_s）を上回る設計震度

2.2 機器要目

2.2.1 固有周期の計算に用いる要目

m _a (kg)	m _c (kg)	m _F (kg)	m _R (kg)	m _w (kg)	m _{v x} (kg)	m _{v y} (kg)	m _{v z} (kg)	A (mm ²)	A _{s x} (mm ²)	A _{s y} (mm ²)	I _x (mm ⁴)	I _y (mm ⁴)
								3.547×10 ⁴	1.773×10 ⁴	1.773×10 ⁴	8.491×10 ⁸	5.924×10 ⁹

E (MPa)	G (MPa)	h _{x 1} (mm)	h _{y 1} (mm)	h _{z 1} (mm)	h _{y 2} (mm)	h ₃ (mm)
192000	73800	2144	1913	2298	625	2538

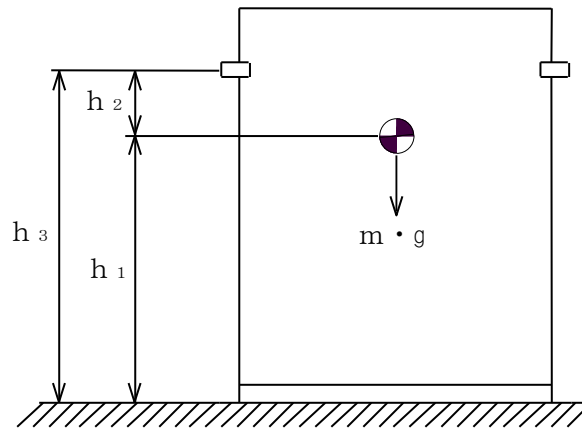
2.2.2 部材の応力評価に用いる要目

m (kg)	m _c (kg)	m _F (kg)	m _R (kg)	m _w (kg)	m _{t h} (kg)	m _s (kg)	m _{s a} (kg)	m _{s t h} (kg)	A (mm ²)	A _{s x} (mm ²)	A _{s y} (mm ²)
[Redacted]									3.547×10 ⁴	1.773×10 ⁴	1.773×10 ⁴

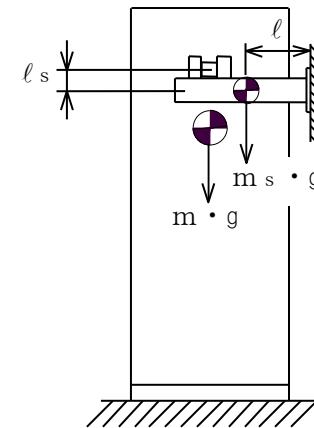
A _p (mm ²)	A _{p x} (mm ²)	A _{p z} (mm ²)	Z _x (mm ³)	Z _y (mm ³)	Z _{p x} (mm ³)	Z _{p z} (mm ³)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	l _s (mm)	l (mm)
1.728×10 ³	642.4	768.9	3.110×10 ⁶	7.571×10 ⁶	7.976×10 ⁴	1.735×10 ⁴	2187	351	2538	175	286

	材料	S _y * (MPa)	S _u * (MPa)	S _y (R T) (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)
ラック	SUS304TP	171	441	205	—	230
サポート	SUS304					

注記*：周囲環境温度(100℃)で算出



X方向 (長辺方向)



Y方向 (短辺方向)

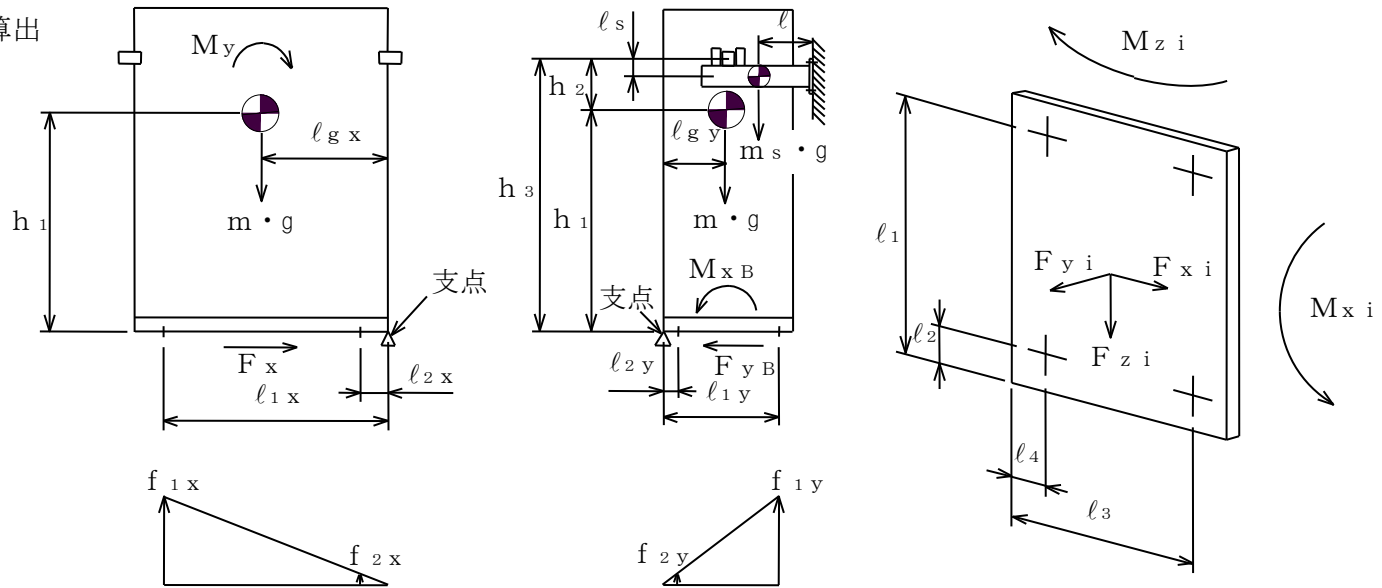
2.2.3 基礎ボルトの応力評価に用いる要目

m (kg)	m _s (kg)	d (mm)		A _b (mm ²)		ℓ _{1x} (mm)	ℓ _{2x} (mm)	ℓ _{1y} (mm)	ℓ _{2y} (mm)
		底部基礎ボルト	サポート部基礎ボルト	底部基礎ボルト	サポート部基礎ボルト				
		24 (M24)	16 (M16)	452.4	201.1	1470	150	540	60

ℓ (mm)	ℓ _s (mm)	ℓ ₁ (mm)	ℓ ₂ (mm)	ℓ ₃ (mm)	ℓ ₄ (mm)	ℓ _{gx} (mm)	ℓ _{gy} (mm)	n	n _{1x}	n _{2x}	n _{1y}	n _{2y}
286	175	265	35	265	35	810	300	4	2	2	2	2

基礎ボルト材料	S _y * (MPa)	S _u * (MPa)	S _y (R T) (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)
SUS304	171	441	205	—	230

注記*：周囲環境温度(100℃)で算出



X方向 (長辺方向)

Y方向 (短辺方向)

2.3 計算数値

2.3.1 部材に生じる応力

(単位：MPa)

部材	応力の種類	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向
ラック	引張 σ_{ft}	—	—	33	13
	せん断 τ_f	—	—	6	5
	組合せ σ_{fa}	—	—	35	15
サポート	引張 σ_{ft}	—	—	14	115
	せん断 τ_f	—	—	2	1
	組合せ σ_{fa}	—	—	14	115

2.3.2 基礎ボルトに生じる応力

(単位：MPa)

基礎 ボルト	応力の種類	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向
底部	引張 σ_b	—	—	146	33
	せん断 τ_b	—	—	56	12
サポート部	引張 σ_b	—	—	3	118
	せん断 τ_b	—	—	2	1

2.4 結論

2.4.1 固有周期 (単位：s)

方向	固有周期
水平方向 (X方向)	$T_x =$
水平方向 (Y方向)	$T_y =$
鉛直方向 (Z方向)	$T_z =$

2.4.2 部材に生じる応力 (単位：MPa)

部材	材料	応力の種類	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
ラック	SUS304TP	引張	—	—	$\sigma_{ft} = 33$	$f_{tm} = 230$
		せん断	—	—	$\tau_f = 6$	$f_{sm} = 132$
		組合せ	—	—	$\sigma_{fa} = 35$	$f_{tm} = 230$
サポート	SUS304	引張	—	—	$\sigma_{ft} = 115$	$f_{tm} = 230$
		せん断	—	—	$\tau_f = 1$	$f_{sm} = 132$
		組合せ	—	—	$\sigma_{fa} = 115$	$f_{tm} = 230$

すべて許容応力以下である。

2.4.3 基礎ボルトに生じる応力 (単位：MPa)

基礎ボルト	材料	応力の種類	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
底部	SUS304	引張	—	—	$\sigma_b = 146$	$f_{ts} = 151^*$
		せん断	—	—	$\tau_b = 56$	$f_{sb} = 132$
サポート部		引張	—	—	$\sigma_b = 118$	$f_{ts} = 172^*$
		せん断	—	—	$\tau_b = 1$	$f_{sb} = 132$

すべて許容応力以下である。

注記* : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$